

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.05.017>

УДК 539.3;616.314-77+615.462

О.Я. Григоренко¹, <https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>

В.В. Кременицький², <https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

В.В. Лось³, <https://orcid.org/0009-0008-1954-1225>

В.О. Маланчук³, <https://orcid.org/0000-0001-8111-0436>

Г.В. Сороченко³, <https://orcid.org/0000-0002-0559-6080>

С.О. Сперкач², <https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>

М.М. Тормахов¹, <https://orcid.org/0000-0003-3182-6094>

¹ Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ

² Технічний центр НАН України, Київ

³ Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, Київ

E-mail: ayagrigorenko1991@gmail.com, krem@nasu.kiev.ua, losvmail@gmail.com,

malanchuk_V_A@ukr.net, svetlana@nasu.kiev.ua, n.n.tormakhov@gmail.com

Аналіз хімічного складу дентальних імплантатів

Вивчено хімічний склад дванадцяти дентальних імплантатів. Якісний та кількісний хімічний склад імплантату і топографію його поверхні визначено методом рентгенівського мікроаналізу за допомогою електронно-зондового мікроаналізатора та сканівного електронного мікроскопа. Досліджено поверхню плоскої частини різальної канавки, гладку хвостову поверхню, поверхні вершин і западин великої та дрібної різб імплантатів. Матеріал, з якого виготовлено імплантат, і його поверхня були неоднорідними за хімічним складом. Поверхні імплантатів у більшості випадків були піддані обробленню для підвищення шорсткості, очищенню, пасивації, покриттю різними матеріалами з метою підвищення біоактивності, гідрофільності та збільшення мікропористої структури.

Ключові слова: дентальний імплантат, хімічний склад, рентгенівський мікроаналіз, неоднорідна поверхня, різьба імплантату.

Ефективним напрямом в ортопедичній стоматології є лікування нестачі зубів з використанням зубних імплантатів, які слугують опорами для зубопротезних пристроїв — коронок та містків [1, 2]. Найширше застосування в лікарській практиці отримали імплантати

Ц и т у в а н н я: Григоренко О.Я., Кременицький В.В., Лось В.В., Маланчук В.О., Сороченко Г.В., Сперкач С.О., Тормахов М.М. Аналіз хімічного складу дентальних імплантатів. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2023. № 5. С. 17—25. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.05.017>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

у формі тіл обертання з різьбою на зовнішній поверхні, які виготовляють з титану та його сплавів [3, 4]. Для встановлення таких імплантатів у кістці щелепи свердлять отвір і в нього загвинчують імплантат, який при цьому нарізає в кістці різьбу. Після встановлення імплантату починається процес відтворення кісткової тканини на його поверхні з утворенням спільної системи імплантат—кістка. Потім на імплантати встановлюють зубні протези.

Успіх чи невдача протезування за допомогою дентальних імплантатів залежить насамперед від стану здоров'я кістки, тканин ясен і пацієнта в цілому [5]. Але важливе значення мають також фактори, які пов'язані з фізико-хімічною структурою та формою імплантату. До цих факторів можна віднести хімічний склад і геометричні параметри дентального імплантату та його поверхні.

Мета дослідження полягає у вивченні хімічного складу матеріалу імплантатів та їх поверхні.

Об'єктом дослідження слугували дванадцять імплантатів, які застосовуються в стоматологічних клініках України.

Методи дослідження. Хімічний склад імплантатів і їх поверхневого шару, що контактує з кістковою тканиною та слизовою оболонкою, досліджували методом рентгенівського мікроаналізу. Цей метод дає змогу без руйнації імплантату визначити якісний та кількісний хімічний склад імплантату і топографію його поверхні. Якісний аналіз хімічного складу виконано на основі закону Мозлі, що встановлює зв'язок між частотою характеристичного рентгенівського випромінювання хімічного елемента і його атомним номером, а кількість хімічного елемента у відсотках визначали за інтенсивністю характеристичних ліній у спектрі випромінювання досліджуваного зразка [6]. Форму імплантату і топографію його поверхні вивчали методом електронного сканування. Згідно з цим методом точно сфокусований електронний промінь потрапляє на поверхню досліджуваного зразка і спричиняє взаємодію електронів зі зразком. У результаті такої взаємодії виникають різні сигнали, що містять інформацію про хімічний склад матеріалу. Ми використовували як сигнал випромінювання вторинних, відбитих електронів [7]. Хімічний склад і топографію поверхні імплантатів досліджували за допомогою рентгенівського мікроаналізатора JXA-8200 та сканівного електронного мікроскопа JSM-6490LV виробництва JEOL Ltd (Японія). До складу сканівного електронного мікроскопа JSM-6490LV належить енергодисперсійний спектрометр INKA Energy 350XT [8].

На рис. 1 проілюстровано отримане електронним скануванням і збільшене в десять разів зображення імплантату. Імплантат поєднує в собі різальний інструмент та опору для протезу. Він складається із забірної (різальної) та прямої частин. Різальна частина імплантату розташована в його апікальній частині і має одну чи декілька повздовжніх різальних канавок з плоскою ділянкою (1). Завдяки канавкам утворюються різальні пера і під час нарізання різьби накопичується кісткова стружка. Пряма частина імплантату знаходиться ближче до його хвостової частини і бере участь у прикінцевому формуванні різьби в кістці. На зовнішній поверхні імплантату може бути сформовано один чи два типи різьб — великий та дрібний.

Кістка щелепи має неоднорідну структуру. Зовнішня (кортикальна) частина кістки значно щільніша та міцніша за губчасту кістку, що знаходиться в її глибині. Велика різьба імплантату розташована в його апікальній та середній частині і контактує з губчастою кісткою щелепи, а дрібна — з кортикальною [4].

Таблиця 1. Хімічний склад матеріалу імплантатів, %

Номер імплантату	Ti	Al	V
1	89,82	5,99	4,19
2	89,99	5,94	4,07
3	89,36	6,36	4,21
4	100,00	—	—
5	100,00	—	—
6	100,00	—	—
7	100,00	—	—
8	100,00	—	—
9	100,00	—	—
10	89,03	6,85	4,13
11	100,00	—	—
12	89,32	7,01	3,67
4 — 8, 9	100,00 ± 0,01	—	—
1 — 3, 10, 12	89,52 ± 0,34	6,43 ± 0,43	4,05 ± 0,19

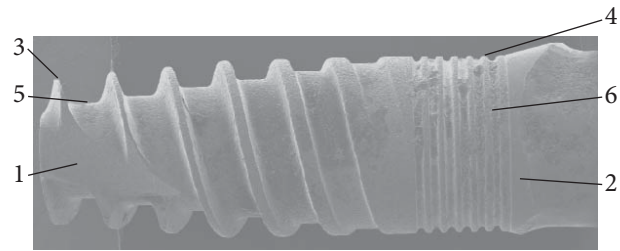


Рис. 1. Імплантат з великою та дрібною різьбами. Зображення отримано електронним скануванням. ×10

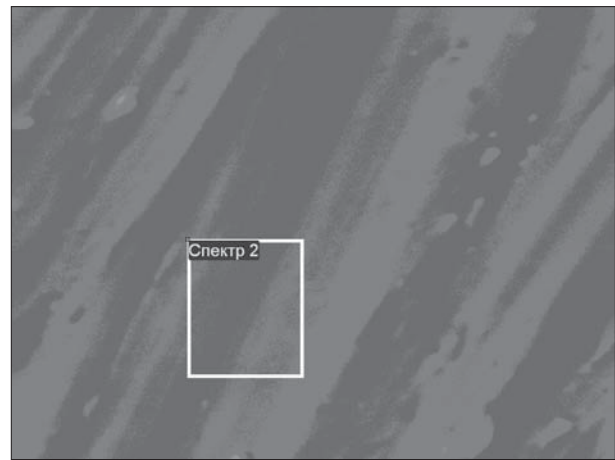


Рис. 2. Зображення у вторинних електронах ділянки, на якій визначали хімічний склад імплантату № 2

У процесі нашого дослідження визначали хімічний склад матеріалу тіла імплантату та його поверхні. Поверхню досліджували на плоскій частині різальної канавки (1), гладкій хвостовій поверхні (2), вершинах (3, 4) та западинах (5, 6) великої та дрібної різьб.

Поверхня імплантату була неоднорідною за хімічним складом, тому його визначали в декількох місцях на площі прямокутної ділянки і усереднювали результати обстеження. Зображення у вторинних електронах ділянки, на якій визначали хімічний склад імплантату № 2 (рис. 2), ілюструє неоднорідність хімічного складу його поверхні. На рис. 3 наведено спектр характеристичного рентгенівського випромінювання, який характеризує якісний та кількісний хімічний склад поверхні імплантату.

У табл. 1 зведено результати визначення концентрації хімічних елементів дванадцяти імплантатів у масових відсотках. Концентрацію хімічних елементів вимірювали по K -лініях характеристичного рентгенівського випромінювання.

За даними хімічного складу матеріалу імплантатів (див. табл. 1) було обчислено середнє значення $\bar{x}^{(i)}$ хімічного елемента в сплаві і довірчий інтервал, у якому знаходиться це середнє значення. Середнє для вибірки даних визначали за формулою [12]

$$\bar{x}^{(i)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^{(i)}, \quad (1)$$

де $n = 5$ — кількість вимірювань; $x_k^{(i)}$ — величина k -го вимірювання i -го хімічного елемента.

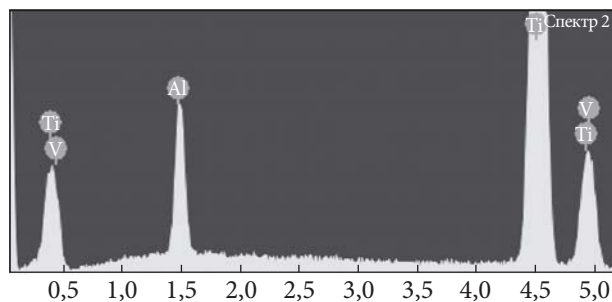


Рис. 3. Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання ділянки, на якій визначали хімічний склад імплантату № 2. Повна шкала 641 імп. Курсор 0,000

Результат вимірювання відсоткового складу i -го хімічного елемента можна записати в вигляді

$$\bar{x}^{(i)} \pm \varepsilon^{(i)}, \quad (2)$$

де $\varepsilon^{(i)}$ — довірчий інтервал, в якому знаходиться середнє значення. Довірчий інтервал визначали таким чином:

$$\varepsilon^{(i)} = t s^{(i)}, \quad (3)$$

де t — коефіцієнт Стьюдента, який визначали для рівня довіри $p = 0,95$; $s^{(i)}$ — середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання [13]. Середньоквадратичне відхилення $s^{(i)}$ для i -го хімічного елемента оцінювали за формулою

$$s^{(i)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k^{(i)} - \bar{x}^{(i)})^2}{n(n-1)}}. \quad (4)$$

Сім з дванадцяти імплантатів (58,3 %) були виготовлені з чистого титану, інші (41,7 %) — зі сплаву титану, процентний склад якого наведено в останньому рядку табл. 1. Середнє значення складу сплаву і довірчий інтервал для середнього обчислено за формулами (1) — (4). Цей сплав можна віднести до альфа-бета титанового сплаву Ti—6Al—4V, який має високу питому відносно маси міцність і корозійну стійкість [11]. Сплав використовується в аерокосмічній промисловості та медицині, де потрібна мала густина, підвищена корозійна стійкість і висока порівняно з традиційними нержавними сталлями та сплавами на основі кобальту біосумісність.

Для швидкого та стабільного зчеплення з кісткою поверхня імплантату повинна мати характеристики, які сприяють остеоінтеграції імплантату. Поверхню імплантатів піддають спеціальному обробленню для підвищення шорсткості, а також очищенню, пасивації, покриттю різними матеріалами та стерилізації [9]. Пасивація полягає в утворенні на поверхні імплантату тонких оксидних покриттів, які захищають метал від корозії. Як покривні використовують спеціальні матеріали. Поверхня імплантату після такого оброблення стає біоактивною, гідрофільною і має багаторівневу мікропористу структуру [10].

Хімічний склад поверхні містив багато хімічних елементів. Наприклад, поверхня імплантату № 2 крім титану, алюмінію та ванадію, які входили до основного хімічного складу матеріалу, також містила на ділянці плоскої канавки (1) ще вуглець, кисень та кальцій. Ці

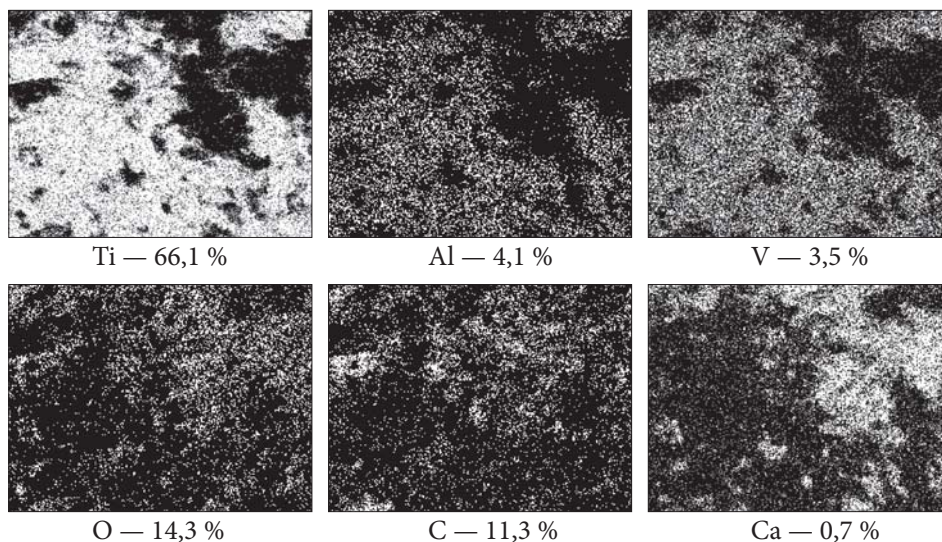


Рис. 4. Просторовий розподіл та відсотковий склад хімічних елементів по площі плоскої частини різальної канавки 1

хімічні елементи були розподілені неоднорідно. Зображення ділянки поверхні, що була обстежена в рентгенівському характеристичному випромінюванні (рис. 4), показує розподіл цих хімічних елементів по площі. Білі точки відповідають наявності хімічного елемента, вказаного під кожним зображенням.

На інших ділянках поверхні імплантату № 2 були наявні також натрій, кремній, фосфор та сірка. Вимірювання відсоткового складу хімічних елементів повторювали декілька разів з обчисленням за формулами (1) — (4) середнього значення $\bar{x}^{(i)}$ та довірчого інтервалу $\varepsilon^{(i)}$. Величина довірчого інтервалу характеризує однорідність поширення хімічного елемента. Зі збільшенням довірчого інтервалу зростає неоднорідність розподілу хімічних елементів по площі поверхні. У табл. 2 наведено середнє значення $\bar{x}^{(i)}$ та $\varepsilon^{(i)}$ для кожного хімічного елемента на поверхнях усіх імплантатів.

Згідно з даними табл. 2, імплантат № 1 не має спеціального покриття, а наявність заліза та вуглецю на його поверхні може бути наслідком його контакту з металорізальним інструментом під час механічного оброблення. Значна кількість кисню на поверхні імплантатів №№ 2, 3, 8, 9 може бути наслідком утворення оксидів титану, алюмінію та ванадію в результаті пасивації поверхні цих імплантатів. Наявність інших хімічних елементів є наслідком оброблення поверхні імплантату матеріалами, які містять кальцій, гідроксіапатити, трикальційфосфат та ін. Наприклад, оброблення поверхні іонами кальцію (Ca^+) з утворенням наноструктури CaTiO_3 [10]. Іони кальцію сприяють активуванню остеобластів і стимулюванню остеointegraції імплантату. Завдяки нанесенню іонів кальцію поверхня імплантату повністю очищується від залишків сірчаної та соляної кислот, якими попередньо обробляють імплантат з метою збільшення його активної поверхні.

Найбільш однорідним за хімічним складом було покриття імплантатів №№ 1 і 3, а найбільш неоднорідним — розподіл хімічних елементів на імплантатах №№ 2, 5 та 9, що були піддані після пасивації спеціальному хімічному обробленню.

Таблиця 2. Хімічний склад поверхні імплантату, %

Номер імплантату	Параметр	Ti	Al	V	C	Fe	O	Ca	Na	Si	P	S	Cl	K	Mg
1	$\bar{x}^{(i)}$	88,8	6,2	4,9	0,7	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	1,3	0,3	1,7	0,8	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	$\bar{x}^{(i)}$	47,3	3,0	2,2	12,1	—	26,0	4,7	0,2	1,5	3,0	0,1	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	43,4	2,7	2,2	18,8	—	14,6	9,2	0,3	3,0	5,1	0,2	—	—	—
3	$\bar{x}^{(i)}$	64,1	4,2	3,0	—	—	28,0	—	—	—	0,7	—	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	1,2	0,2	—	1,1	—	14,1	—	—	—	0,2	—	—	—	—
4	$\bar{x}^{(i)}$	70,6	11,8	0,5	1,0	0,2	12,9	0,4	1,1	0,4	—	0,3	0,3	0,4	—
	$\varepsilon^{(i)}$	25,1	11,0	1,0	1,9	0,3	12,5	0,6	1,4	0,6	—	0,4	0,5	0,5	—
5	$\bar{x}^{(i)}$	65,6	15,5	—	—	—	18,9	0,1	—	—	—	—	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	45,2	23,9	—	—	—	22,4	0,2	—	—	—	—	—	—	—
6	$\bar{x}^{(i)}$	49,3	8,6	—	19,0	—	22,8	0,3	—	—	—	0,2	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	31,1	10,3	—	19,6	—	13,5	0,3	—	—	—	0,2	—	—	—
7	$\bar{x}^{(i)}$	58,1	—	—	15,2	—	22,8	1,70	—	—	—	0,8	0,3	0,8	1,1
	$\varepsilon^{(i)}$	27,5	—	—	21,9	—	9,5	1,7	—	—	—	1,7	1,2	0,7	0,1
8	$\bar{x}^{(i)}$	42,6	—	—	17,9	—	29,7	7,8	1,2	—	3,4	0,4	0,2	0,3	—
	$\varepsilon^{(i)}$	38,2	—	—	20,5	—	31,1	8,4	1,3	—	3,9	0,5	0,2	0,4	—
9	$\bar{x}^{(i)}$	38,8	0,4	—	—	—	34,0	11,9	1,1	0,5	7,3	0,9	1,0	1,9	1,6
	$\varepsilon^{(i)}$	41,9	0,7	—	—	—	21,3	11,9	1,3	1,0	6,7	1,1	0,9	2,1	2,1
10	$\bar{x}^{(i)}$	62,6	3,7	2,7	21,0	—	7,3	2,5	—	—	—	0,2	—	—	—
	$\varepsilon^{(i)}$	16,1	1,1	0,8	12,4	—	6,5	2,9	—	—	—	0,2	—	—	—
11	$\bar{x}^{(i)}$	42,3	—	—	13,3	—	31	7,8	0,2	0,1	—	0,3	0,1	0,1	—
	$\varepsilon^{(i)}$	15,1	—	—	9,5	—	11,4	4,5	0,4	0,1	—	0,5	0,1	0,3	—
12	$\bar{x}^{(i)}$	54,3	3,4	2,5	18,9	—	12,7	5,1	0,2	0,1	2,2	0,2	0,1	0,2	—
	$\varepsilon^{(i)}$	19,1	1,2	0,9	8,7	—	7,6	5,9	0,2	0,1	3,0	0,3	0,2	0,3	—

Висновки. Визначено хімічний склад матеріалу та поверхні дванадцяти імплантів. Було досліджено поверхню плоскої частини різальної канавки, гладку хвостову поверхню, поверхні вершин і западин великої та дрібної різьб імплантів. Покриття поверхні імплантату було неоднорідним за хімічним складом. Тому хімічний склад на окремих ділянках поверхні визначали декілька разів і результати усереднювали. Матеріал частини імплантів (58,3 %) був із чистого титану, а частини (41,7 %) — сплавом титану, алюмінію та ванадію. Сплав мав такий хімічний склад: титан — $89,52 \pm 0,34$ %, алюміній — $6,43 \pm 0,43$ %, ванадій — $4,05 \pm 0,19$ % і його можна віднести до альфа-бета титанового сплаву Ti—6Al—4V.

Поверхню імплантатів у більшості випадків було піддано обробленню для підвищення шорсткості, очищенню, пасивації, покриттю різними матеріалами з метою підвищення біоактивності, гідрофільності та збільшення мікропористої структури. Хімічний склад поверхні містив титан, алюміній та ванадій, які входили до основного хімічного складу матеріалу, та вуглець, кисень, кальцій, натрій, кремній, фосфор, сірку, залізо, калій, хлор, магній, що були додані під час спеціального оброблення імплантату. Ці хімічні елементи були розподілені по площі поверхні неоднорідно, що було підтверджено зображеннями ділянок в рентгенівському характеристичному випромінюванні. Оскільки хімічний склад поверхні був розподілений на кожній ділянці неоднорідно, вимірювання відсоткового складу хімічних елементів повторювали декілька разів з обчисленням середнього значення та довірчого інтервалу для нього. Обстеження показали, що один імплантат з дванадцяти взагалі не мав спеціального покриття, але містив залізо та вуглець, що могло бути наслідком контакту з металорізальним інструментом під час механічного оброблення. Значна кількість кисню на поверхнях імплантатів свідчить про утворення оксидів титану, алюмінію та ванадію в результаті пасивації поверхні. Наявність інших хімічних елементів є наслідком оброблення поверхні імплантату іонами кальцію, гідроксіапатитами, трикальційфосфатом та іншими біоактивними покривними матеріалами.

Оскільки поверхня всіх імплантатів містить різного виду включення багатьох металів, можна вважати, що біологічні властивості цих поверхонь також будуть різними. Відповідно, біологічна взаємодія цих поверхонь з кісткою також буде різною, як і результат цієї взаємодії. Тим паче, що і кістка може бути спонгіозною або кортикальною і по-різному взаємодіяти з такими різними поверхнями імплантатів. Реакцію сполучної тканини потрібно враховувати для запобігання можливим ускладненням.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Esposito M., Ardebili Y., Worthington H.V. Interventions for replacing missing teeth: different types of dental implants. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2014. Iss. 7. CD003815. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003815.pub4>
2. Worthington P., Branemark P.-I. *Advanced osseointegration surgery: applications in the maxillofacial region.* Carol Stream, Illinois: Quintessence Pub. Co., 1992. 403 p.
3. *Dental biomechanics:* Natali A.N. (Ed.). London: Taylor & Francis, 2003. 265 p.
4. Grigorenko A. Ya., Los' V.V., Malanchuk V.A., Tormakhov N.N. Stress state of a threaded joint in a dental implant–bone system. *Int. Appl. Mech.* 2020. **56**. P. 33–39. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00994-z>
5. Lyakhov P.A., Dolgalev A.A., Lyakhova U.A., Muraev A.A., Zolotayev K.E., Semerikov D.Y. Neural network system for analyzing statistical factors of patients for predicting the survival of dental implants. *Front. Neuroinform.* 2022. **16**. <https://doi.org/10.3389/fninf.2022.1067040>
6. Packwood R. A comprehensive theory of electron probe microanalysis. *Electron probe quantitation:* Heinrich K.F.J., Newbury D.E. (Eds.). Boston, MA: Springer, 1991. P. 83–104. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2617-3_6
7. Akhtar K., Khan S.A., Khan S.B., Asiri A.M. Scanning electron microscopy: principle and applications in nanomaterials characterization. *Handbook of materials characterization:* Sharma S. (Ed.). Cham: Springer, 2018. P. 113–145. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_4
8. Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одноралов І.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О., Трачевський В.С. Аналіз фізико-хімічних властивостей металевих фрагментів корпусів артилерійських снарядів на основі експериментального підходу. *Озброєння та військова техніка.* 2022. № 1. С. 43–57. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).43-57](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).43-57)
9. Неспрядько В., Куц П. *Дентальна імплантологія. Основи теорії та практики.* Київ: Самміт-книга, 2015. 348 с.

10. Bang S.-M., Moon H.-J., Know Y.-D., Yoo J.-Y., Pae A., Kwon I.K. Osteoblastic and osteoclastic differentiation on SLA and hydrophilic modified SLA titanium surfaces. *Clin. Oral Implants Res.* 2014. 25, № 7. P. 831—837. <https://doi.org/10.1111/clr.12146>
11. ASTM B265-20a. Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. <https://doi.org/10.1520/B0265-20A>
12. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. Москва: Высш. школа, 1988. 239 с.
13. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Москва: Стандарт, 2001.

Надійшло до редакції 17.05.2023

REFERENCES

1. Esposito, M., Ardebili, Y. & Worthington, H. V. (2014). Interventions for replacing missing teeth: different types of dental implants. *Cochrane Database Syst. Rev.*, Iss. 7, CD003815. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003815.pub4>
2. Worthington, P. & Branemark, P. -I. (1992). *Advanced osseointegration surgery: applications in the maxillofacial region.* Carol Stream, Illinois: Quintessence Pub. Co.
3. Natali A. N. (Ed.). (2003). *Dental biomechanics.* London: Taylor & Francis.
4. Grigorenko, A. Y., Los, V. V., Malanchuk, V. A. & Tormakhov, N. N. (2020). Stress state of a threaded joint in a dental implant—bone system. *Int. Appl. Mech.*, 56, pp. 33-39. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00994-z>.
5. Lyakhov, P. A., Dolgalev, A. A., Lyakhova, U. A., Muraev, A. A., Zolotayev, K. E. & Semerikov, D. Y. (2022). Neural network system for analyzing statistical factors of patients for predicting the survival of dental implants. *Front. Neuroinform.*, 16. <https://doi.org/10.3389/fninf.2022.1067040>
6. Packwood, R. (1991). A comprehensive theory of electron probe microanalysis. In Heinrich, K. F. J. & Newbury, D. E. (Eds.). *Electron probe quantitation* (pp. 83-104). Boston, MA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2617-3_6
7. Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B. & Asiri, A. M. (2018). Scanning electron microscopy: principle and applications in nanomaterials characterization. In Sharma, S. (Ed.). *Handbook of materials characterization* (pp. 113-145). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_4
8. Bogdanov, V. L., Grigorenko, O. Ya., Chepkov, I. B., Odonoralov, I. V., Kremenitsky, V. V., Sperkach, S. O. & Trachevsky, V. S. (2022). Analysis of physical and chemical properties of metal fragments of shells of artillery shells based on an experimental approach. *Weapons and military equipment*, № 1, pp. 43-57 (in Ukrainian). [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).43-57](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).43-57)
9. Nesprayd'ko, V. & Kuts, P. (2015). *Dental implantology. Fundamentals of theory and practice.* Kyiv: Sammit-knyha (in Ukrainian).
10. Bang, S.-M., Moon, H.-J., Know, Y.-D., Yoo, J.-Y., Pae, A. & Kwon, I. K. (2014). Osteoblastic and osteoclastic differentiation on SLA and hydrophilic modified SLA titanium surfaces. *Clin. Oral Implants Res.*, 25, No. 7, pp. 831-837. <https://doi.org/10.1111/clr.12146>
11. ASTM B265-20a. Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. <https://doi.org/10.1520/B0265-20A>
12. Lvovsky, E. N. (1988). *Statistical methods of building empirical formulas.* Moscow: Vysshaya shkola (in Russian).
13. GOST 8.207-76. Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of observations. Moscow: Standard, 2001 (in Russian).

Received 17.05.2023

A. Ya. Grigorenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>
V.V. Kremenitsky², <https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>
V.V. Los³, <https://orcid.org/0009-0008-1954-1225>
V.O. Malanchuk³, <https://orcid.org/0000-0001-8111-0436>
G.V. Sorochenko³, <https://orcid.org/0000-0002-0559-6080>
S.O. Sperkach², <https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>
M.M. Tormakhov¹, <https://orcid.org/0000-0003-3182-6094>

¹ S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv

² Technical Center of the NAS of Ukraine, Kyiv

³ Bogomolets National Medical University, Kyiv

E-mail: ayagrigenko1991@gmail.com, krem@nasu.kiev.ua, losvmail@gmail.com, malanchuk_V_A@ukr.net, svetlana@nasu.kiev.ua, n.n.tormakhov@gmail.com

ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF DENTAL IMPLANTS

The qualitative and quantitative chemical composition of dental implants and the topography of their surfaces were examined using X-ray microanalysis with an X-ray microanalyzer (JXA-8200) and a scanning electron microscope (JSM-6490LV) manufactured by Jeol Ltd (Japan). The surfaces of the flat part of the cutting groove and the surfaces of the tip and the grooves of both large and small dental implant threads were investigated. The chemical composition of dental implant surfaces was found to be heterogeneous. In most cases, implant surfaces had undergone processing to increase surface roughness, clean the surface, passivate it, apply coatings with various materials to enhance its biological activity, and impart hydrophilic properties. These processes also aimed to enhance the microporosity of the implant structure.

Keywords: dental implant, chemical component, X-ray microanalysis, nonhomogeneous surface, implant thread.